第38卷 第3期
2021年5月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 3
May 2021

近40 a中巴经济走廊气候变化时空分布特征

于志翔[1]， 于晓晶[2,3]， 杨 帆[4]

（1. 乌鲁木齐气象卫星地面站，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：中巴经济走廊是“一带一路”倡议的重要组成部分，深入认识该地区气候变化时空分布特征和规律，对于项目顺利实施和安全保障有重大意义。采用CRU TSv4.04逐月地面气候要素数据集，分析1980—2019年中巴经济走廊地区气温、降水、干湿状况的气候变化时空分布特征。结果表明：中巴经济走廊地区气温呈显著上升趋势，中部地区增温速率低于两端地区，最低温度增温速率最快，为0.37 ℃·$(10a)^{-1}$；平均气温次之，增温速率为0.32 ℃·$(10a)^{-1}$；最高温度增温速率最慢，为0.29 ℃·$(10a)^{-1}$。降水量、降水日数与干湿变化的区域性差异较大，其中巴基斯坦西南部降水量显著减少，最大速率为-20 mm·$(10a)^{-1}$，变干趋势明显；巴基斯坦中部地区降水日数显著增加，最大速率为4 d·$(10a)^{-1}$。

关键词：中巴经济走廊；气温；降水；干湿变化

中巴经济走廊纵贯中国新疆喀什与巴基斯坦全境及周边地区，是“一带一路”倡议的重要组成部分。该地区地形多样，气候复杂多变，极端事件频发，严重威胁甚至阻碍工程建设的顺利实施和运营[1-2]。尤其在全球增暖背景下，气候变化与经济发展紧密相扣[3-4]。因此，深入认识中巴经济走廊地区气候变化的时空分布特征和规律，对于中巴经济走廊建设的顺利进行和安全保障有着重要意义。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）评估报告指出，近百年来全球气候在显著变暖，未来气候极端事件的频率、持续时间和范围将增加，对自然和社会系统影响显著[5-6]。干旱半干旱区是全球气候变化的敏感区[7]，由于较强的陆-气相互作用，其增温存在放大效应[8]。如近百年来亚洲中部干旱半干旱区增温幅度明显高于全球平均增速，近40 a来甚至呈现加速趋势。

中巴经济走廊大部分属于干旱半干旱地区[9-10]，生态环境脆弱。全球增暖背景下极端事件的发生会进一步对植被、农业生产、水储量等产生负面影响[11-13]，威胁粮食和水安全，进而影响到社会经济的稳定发展。自1980s以来，中国西北新疆地区的温度、降水呈显著增加趋势[14-15]，且极端升温、水文事件增加[16-17]。同为干旱半干旱区的巴基斯坦也经历着气候变化的考验，该地区地形狭长复杂，气候变化特征明显。观测数据表明其降水在北部地区呈增加趋势，但在南部地区无显著变化，且存在海拔依赖性，与季风影响关系密切[18]。近年来，巴基斯坦地区最高气温和最低气温也均呈显著升高趋势[19]，热浪事件频率增加、强度增强、持续时间延长[20]。伴随着持续升温，蒸发量随之增加，进一步引起该地区干旱频率增多，干旱面积增加[21]。在不同情境下的预估中，中巴经济走廊地区气候变化形势会更加严峻，将带来更严重的社会经济影响[22-23]。

鉴于此，本文采用CRU TSv4.04高分辨率格点分析数据集，对中巴经济走廊地区近40 a的气象要素进行分析，全面了解该地区的气候变化现状，为中巴经济走廊建设提供科学依据。

收稿日期：2020-10-10； **修订日期**：2020-12-14
基金项目：新疆维吾尔自治区区域协同创新专项（上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划）（2019E01005）；新疆维吾尔自治区创新环境建设专项-天山青年计划（2019Q038）
作者简介：于志翔（1988-），男，高级工程师，主要从事环境气象与卫星资料分析研究. E-mail: 676854355@qq.com
通讯作者：于晓晶. E-mail: yuxj@lasg.iap.ac.cn

1 研究区概况

中巴经济走廊位于亚洲西南部(图1),西起中国新疆喀什,南至巴基斯坦瓜达尔港,全长3000 km,面积约为1.32×10^6 km^2。沿线穿越喀喇昆仑山、喜马拉雅山和兴都库什山三大山系交汇区以及帕米尔高原、印度河-恒河平原结合部。地势起伏大,东北高、西南低。大部分地区为干旱半干旱气候,其东部地区受南亚季风影响,干湿季节明显[24]。

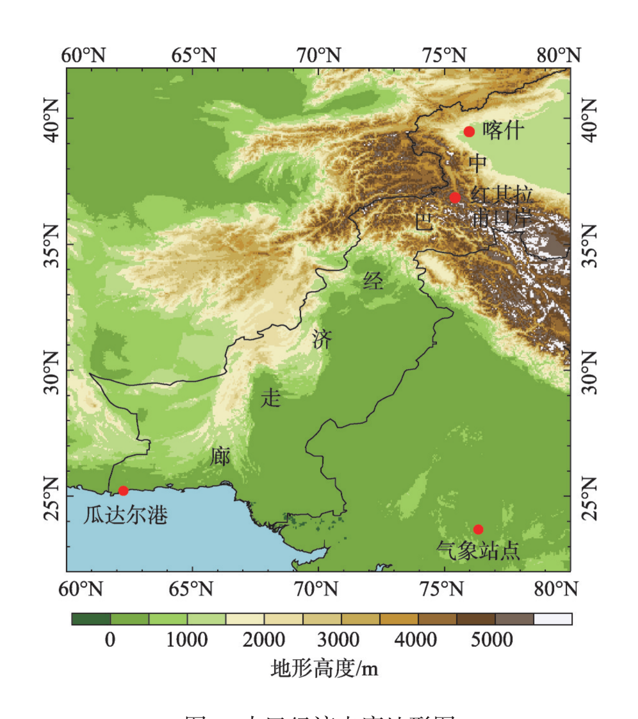


图1 中巴经济走廊地形图

Fig. 1 Topography height of the China-Pakistan Economic Corridor

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本文采用由英国东英格利亚大学气候研究所重建的逐月地面气候要素数据集(CRU TSv4.0)[25]。空间分辨率为0.5°×0.5°,时间序列自1901年至2019年。由于该数据覆盖完整、数据分辨率较高、时间尺度长,被广泛应用于全球与区域气候变化研究[26-27]。本文选取1980—2019年逐月地面气候要素数据,气候要素包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、降水日和潜在蒸发量。

为验证CRU数据在中巴经济走廊地区的可靠性,选取瓜达尔港和红其拉甫口岸地面观测资料与CRU数据进行对比验证。瓜达尔港气象站2017年底建成,2018年投入使用,观测要素包括温度、湿度、气压、风向风速、能见度等。红其拉甫口岸地面观测资料来源于陆气相互作用观测系统,该系统于2017年8月建成,观测要素包括气压、温度、湿度、降水量等。由于地面观测资料有限,瓜达尔港选取2018—2019年月平均气温、月最高气温、月最低气温数据,红其拉甫口岸选取2018—2019年月平均气温数据。

利用双线性插值方法将CRU逐月格点数据插值到对应站点,再与观测数据进行拟合(图2)。站点数据与CRU插值数据拟合较好,斜率近似为1,确定系数R^2达到0.9845。由此可见,CRU数据在中巴经济走廊地区可靠性较高,可用于该地区的气候变化分析。

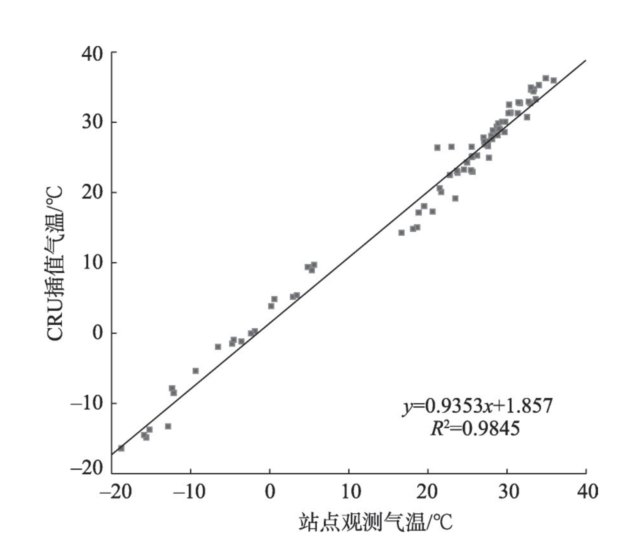


图2 红其拉甫和瓜达尔港站点的观测气温数据与CRU插值气温数据线性拟合

Fig. 2 Linear fitting between the observed temperature data from Khunjerab and Gwadar with CRU temperature data

2.2 研究方法

为了表征某一地区的干湿变化状况,除考虑降水,还需考虑蒸发。因此,本文采用干旱指数(Aridity Index,AI)分析中巴经济走廊地区近40 a的干湿变化特征。其定义为降水量(P_e)与潜在蒸发量(PET)之比[28],即AI=P_e/PET,该值越低,表示越干旱。该干旱指数被广泛应用于干旱区气候变化研究[29]。其中PET计算采用联合国粮农组织(FAO)推荐的彭曼方法[30-31]。

彭曼方法计算公式如下:

$$PET_{PM}=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \quad (1)$$

式中：PET_{PM}为潜在蒸发量(mm·d^{-1})；R_n为地表净辐射(MJ·m^{-1}·d^{-1})；G为土壤热通量(MJ·m^{-2}·d^{-1})；T为平均温度(℃)；u为风速(m·s^{-1})；e_s为饱和水汽压(kPa)；e_a为实际水汽压(kPa)；Δ为饱和水汽压曲线斜率(kPa·℃$^{-1}$)；γ为干湿表常数(kPa·℃$^{-1}$)。

本文主要采用Theil-Sen线性趋势方法来计算中巴经济走廊地区各气象要素的变化趋势，该方法计算效率高，对于测量误差和离群数据不敏感，常被用于长时间序列数据的趋势分析。

$$\beta=\mathrm{mean}\left(\frac{x_j-x_i}{j-i}\right), \forall j>i \quad (2)$$

式中：x_j 和 x_i 为时间序列数据；β 大于0表示时间序列呈上升趋势；β 小于0表示时间序列呈下降趋势。

另外，采用Mann-Kendall检验方法来检测时间序列变化趋势是否稳定或显著。其统计检验方法如公式(3)所示，对于时间序列 x_i $(i=1, 2, \cdots i, \cdots j, \cdots, n)$ 定义标准化检验统计量 Z 。

$$Z=\begin{cases}\frac{S}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & (S>0)\\ 0, & (S=0)\\ \frac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & (S<0)\end{cases} \quad (3)$$

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sign}(x_j-x_i) \quad (4)$$

$$\mathrm{sign}(\theta)=\begin{cases}1, & (\theta>0)\\ 0, & (\theta=0)\\ -1, & (\theta<0)\end{cases} \quad (5)$$

$$\mathrm{Var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中：x_j 和 x_i 为时间序列数据；n 为数据个数；当$n\geq 8$时，检验统计量 S 近似为正态分布。

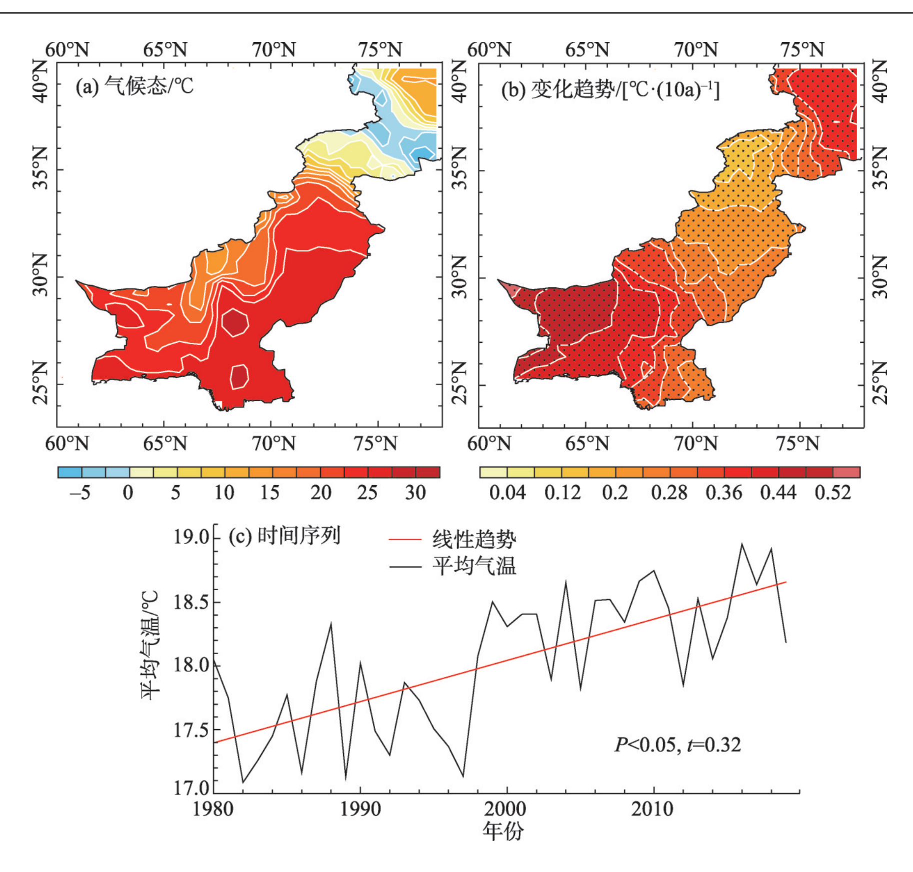
3 中巴经济走廊气候变化特征

3.1 气温变化特征

图3为平均气温的气候态与变化趋势。由平均气温气候态的空间分布可知(图3a)，中巴经济走廊地区平均气温的气候态空间分布差异较大，总体表现为随着地形高度的增加而减小，自西南向东北逐渐减小。大部分地区平均气温在20 ℃以上，最低值为−7.5 ℃，主要出现在中巴交界处的帕米尔高原；最高值为32.5 ℃，出现在巴基斯坦南部。由平均气温的变化趋势空间分布可知(图3b)，近40 a来，中巴经济走廊地区平均气温呈显著的上升趋势，平均气温增加速率呈现东北部和西南部高、中部低的分布特征。西南部和东北部地区增温速率均超过0.32 ℃·(10a)$^{-1}$，其中最大值出现在最西端，增温速率为0.52 ℃·(10a)$^{-1}$；中部地区增温速率相对略低，在0.08~0.28 ℃·(10a)$^{-1}$之间。由区域平均气温的时间序列可知(图3c)，中巴经济走廊地区平均气温为18 ℃，近40 a来以0.32 ℃·(10a)$^{-1}$的速率显著($P<0.05$)上升。从1998年开始增温明显，由17.5 ℃上升到2019年的18.5 ℃。

由最高气温气候态的空间分布可知(图4a)，中巴经济走廊地区最高气温的气候态空间分布差异较大，总体表现为随着地形高度的增加而减小，自西南向东北逐渐减小。大部分地区最高气温在25 ℃以上，最低值为−5 ℃，主要出现在中巴交界喀喇昆仑山区域；最高值为40 ℃，出现在巴基斯坦南部印度河平原。近40 a来，中巴经济走廊地区最高气温呈显著的上升趋势，最高气温增加速率呈现从西南部向东北部逐渐减小的分布特征(图4b)。西南部地区增温速率均在0.32 ℃·(10a)$^{-1}$以上，其中最大值位于西南部，超过0.48 ℃·(10a)$^{-1}$；中部和东北部地区增温速率相对略低，在0.04~0.28 ℃·(10a)$^{-1}$之间。近40 a中巴经济走廊地区的最高气温以0.29 ℃·(10a)$^{-1}$的速率显著($P<0.05$)上升(图4c)。其最大值出现在2016年，达25.8 ℃，最小值出现在1982年，只有23.9 ℃。增温开始于1998年，由24.5 ℃上升到2019年的25.5 ℃。

由最低气温气候态的空间分布可知(图5a)，中巴经济走廊地区最低气温的气候态空间分布差异较大，总体随着地形高度的增加而逐渐降低，自南向北、自西向东最低气温逐渐降低。巴基斯坦大部分地区最低气温在15 ℃以上，最高值为22.5 ℃，出现在巴基斯坦南部印度河平原和沿海地区，最低值出现在中巴交界的喀喇昆仑山区域，在−15~−5 ℃之间。近40 a来中巴经济走廊地区最低气温呈显著的上升趋势(图5b)。与平均气温(图3b)类似，呈现两端高中间低的分布特征。西南部和东北部地区增温速率均在0.4 ℃·(10a)$^{-1}$以上，其中最大值出现在巴基斯坦最西部和我国的喀什地区，为0.6 ℃·(10a)$^{-1}$；



注：黑点表示变化趋势通过90%水平的显著性检验；t为线性趋势线斜率。下同。

图3 1980—2019年中巴经济走廊地区平均气温的变化特征

Fig. 3 Climatology and changes of mean near-surface temperature in CPEC during 1980–2019

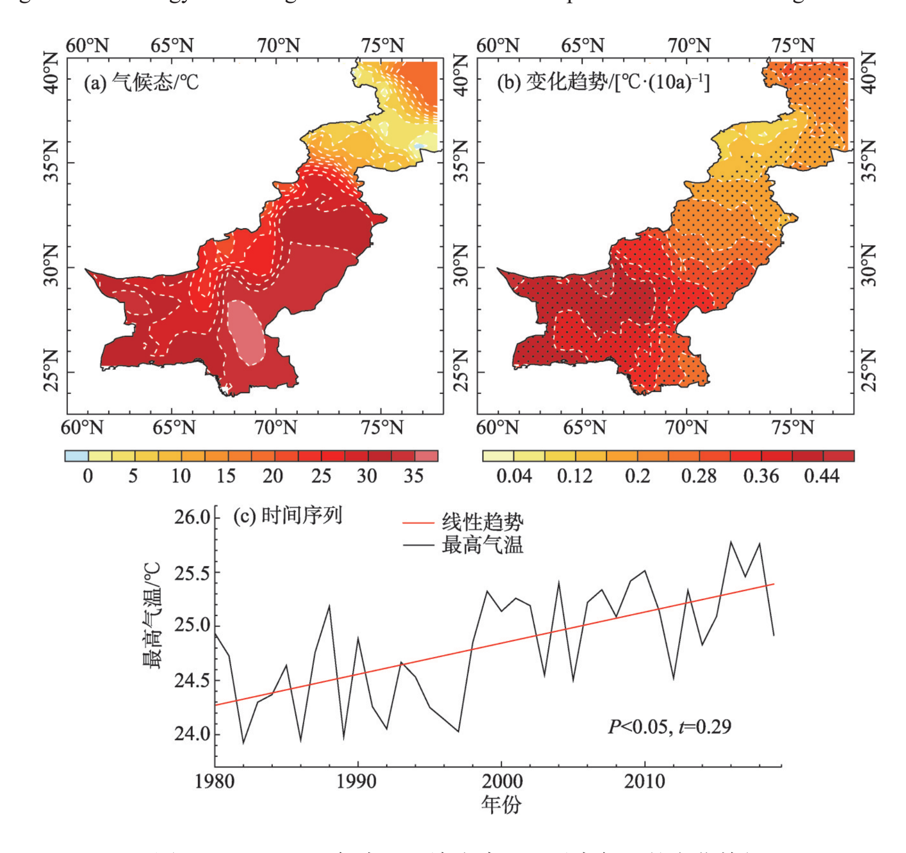


图4 1980—2019年中巴经济走廊地区最高气温的变化特征

Fig. 4 Climatology and changes of maximum near-surface temperature in CPEC during 1980–2019

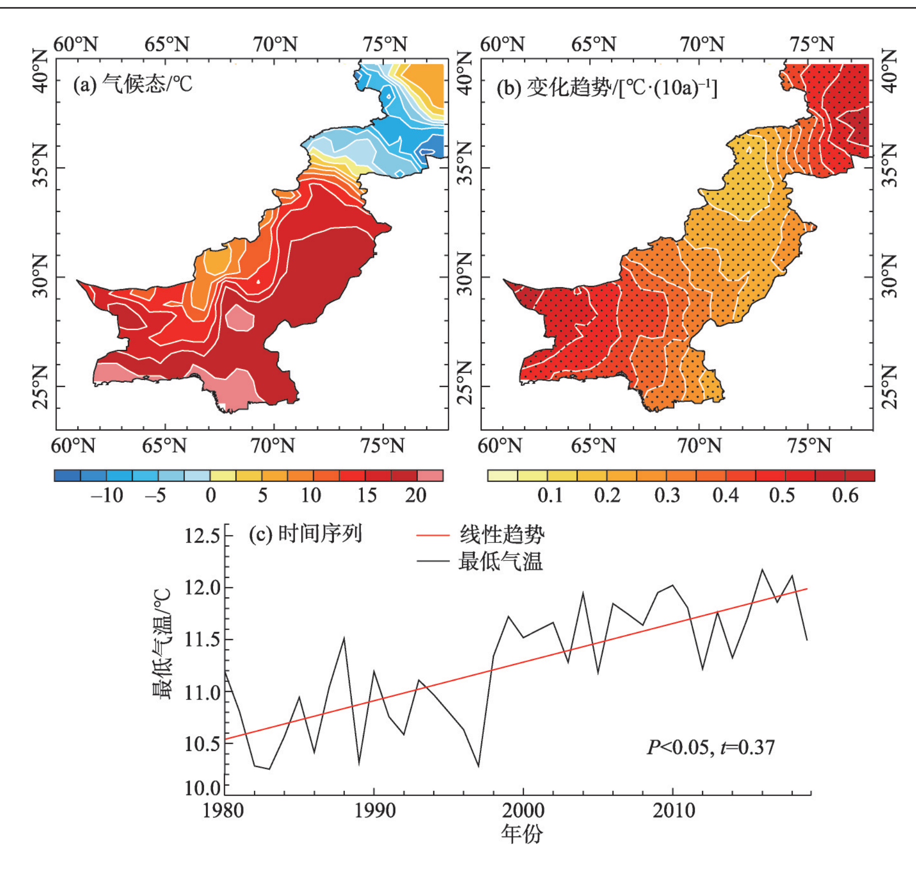


图5　1980—2019年中巴经济走廊地区最低气温的变化特征

Fig. 5　Climatology and changes of minimum near-surface temperature in CPEC during 1980−2019

中部地区增温速率相对略低,在0.1~0.4 ℃·(10a)$^{-1}$之间。近40 a研究区最低气温以0.37 ℃·(10a)$^{-1}$的速率显著($P<0.05$)上升(图5c)。由1998年的11 ℃上升到2019年的12 ℃。

3.2　降水变化特征

图6为降水量的气候态与变化趋势。由降水量气候态的空间分布可知(图6a),中巴经济走廊地区降水量的气候态空间分布差异明显,由西南部向东北部先增加后减少。最大降水区域位于32°~35°N、71°~75°E,超过1200 mm。其他大部分地区年降水量在600 mm以下,其中巴基斯坦西南部和我国喀什地区年降水量不足100 mm。近40 a来研究区降水量变化趋势区域性差异明显,从西南部到东北部呈减少、增加依次交替分布(图6b)。西南部和中东部地区降水量减少速率均在−10 mm·(10a)$^{-1}$以上,其中,最大值分布在西南部俾路支高原和中部巴基斯坦首都伊斯兰堡地区,降水量减少速率超过−30 mm·(10a)$^{-1}$;中部70°~74°E地区和我国喀什地区降水量均有所增加,大部分地区增幅在0~20 mm·(10a)$^{-1}$之间,降水量增幅最大出现在巴基斯坦西北部山区,超过25 mm·(10a)$^{-1}$。近40 a研究区降水量整体以−1.44 mm·(10a)$^{-1}$的速率减少(图6c)。降水量由2000年之前的295 mm下降到2019年的275 mm。

由降水日数气候态的空间分布可知(图7a),中巴经济走廊地区降水日数的气候态与降水量分布类似(图5a),呈中部多、东北部和西南部少的空间分布特征。中巴经济走廊中部地区年降水日数最多可超过120 d,其他大部分地区在80 d以下,其中巴基斯坦西南部和中国喀什地区年降水日数不足20 d。近40 a来,该地区降水日数变化区域性差异较大,也呈现中部增加两头减少的空间分布特征(图7b)。西南部和东北部地区降水日数有所减少,大部分地区速率为−1 d·(10a)$^{-1}$,最大值出现在我国的喀什地区,降水日数减少速率超过−5 d·(10a)$^{-1}$。中部地区降水日数呈显著增加趋势,大部分地区增幅在2~3 d·(10a)$^{-1}$之间,降水日数增幅最大出现巴基斯坦70°E地区,超过4 d·(10a)$^{-1}$。近40 a该地区的降水日数整体有所增加(图7c)($P=0.666$),其增加速率为0.68 d·(10a)$^{-1}$。降水日数由1980年的40 d上升到2019年的42.7 d。

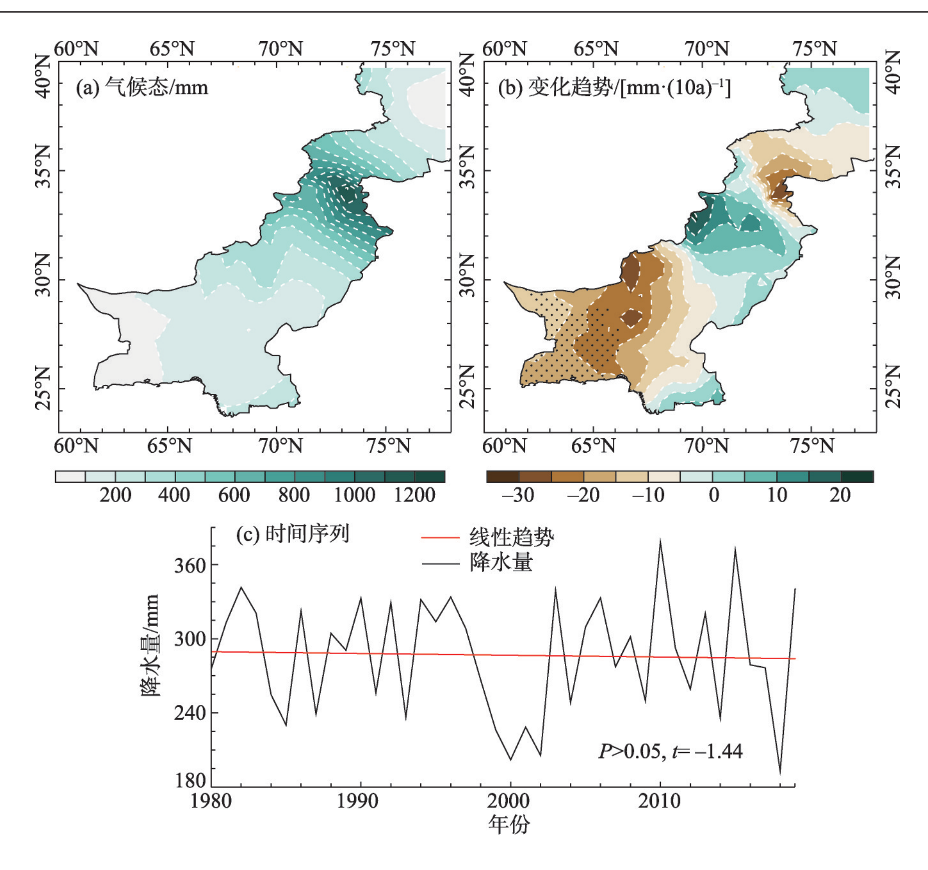


图6 1980—2019年中巴经济走廊地区降水量的变化特征

Fig. 6 Climatology and changes of precipitation in CPEC during 1980–2019

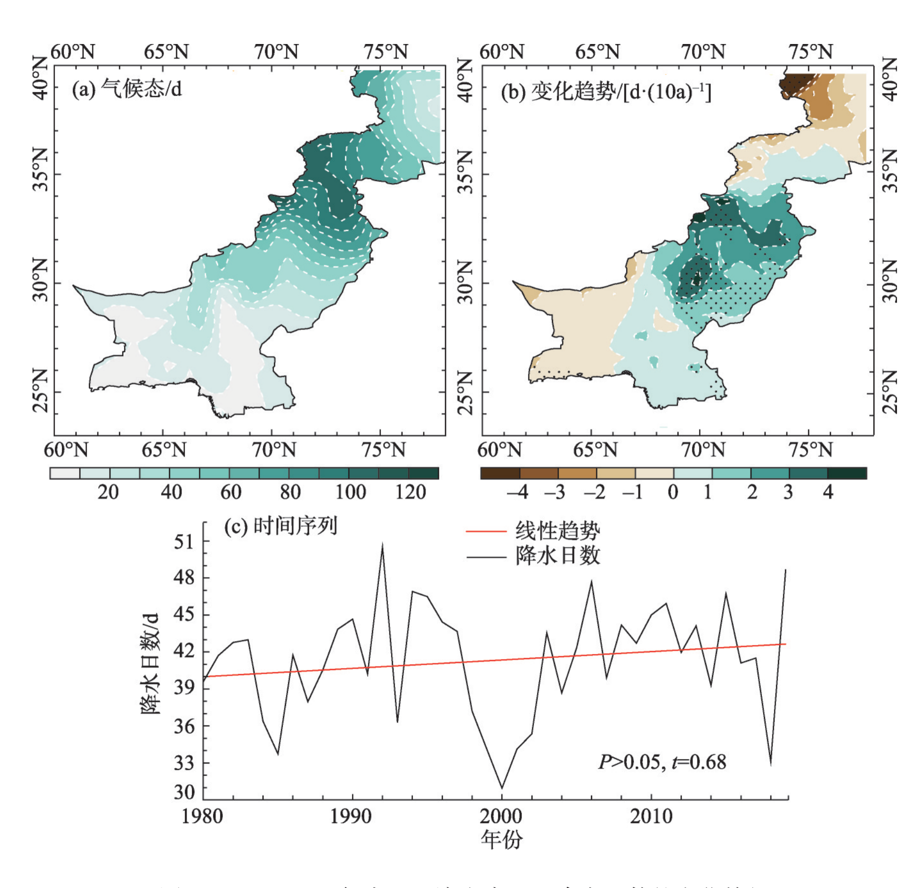


图7 1980—2019年中巴经济走廊地区降水日数的变化特征

Fig. 7 Climatology and changes of wet days in CPEC during 1980–2019

3.3 干湿变化特征

中巴经济走廊地区干旱指数气候态的空间分布与降水分布一致(图8a)，中部地区为湿润半湿润地区(低于0.5)，两端地区主要为干旱半干旱地区(0.05~0.5)，其西南地区为极端干旱地区(低于0.05)。近40 a来研究区干湿变化存在显著的区域差异(图8b)。从西南部向东北部正负中心交替出现，即巴基斯坦西南部与东北部呈变干趋势，尤其是西南侧的干旱半干旱地区变干趋势显著。而中部地区与中国新疆地区则呈变湿趋势，但显著性较弱。近40 a研究区的干旱指数变化趋势较弱，即该地区的平均干湿状况变化极小(图8c)。

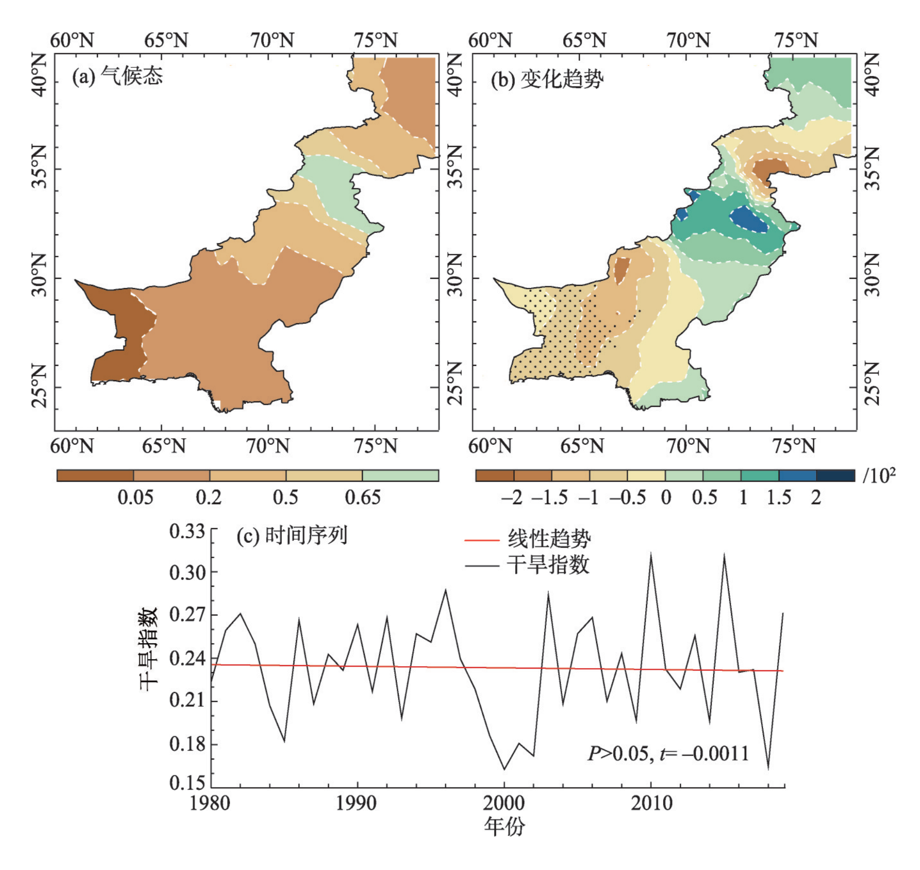


图8　1980—2019年中巴经济走廊地区湿润指数的变化特征

Fig. 8　Climatology and changes of AI in CPEC during 1980–2019

4 结 论

利用最新的CRU TSv4.04逐月地面气候要素数据集和现有的地面观测资料，对近40 a中巴经济走廊地区气候变化特征进行分析，主要结论如下：

(1) 瓜达尔港和红旗拉普站点数据与CRU插值数据拟合较好，斜率近似为1，确定系数R^2达到0.9845。由此可见，CRU资料在中巴经济走廊地区可靠性较高，适用于该地区的气候变化分析。

(2) 气温表现为自西南向东北逐渐减少的空间分布特征，平均气温范围为−5~30 ℃，最高气温为0~35 ℃，最低气温为−15~20 ℃。近40 a来，中巴经济走廊地区的温度均呈显著上升趋势，总体表现为中间增温速率低于两端增温速率。温度平均值在20世纪90年代末发生突变。最低温度的增温速率最快，为0.39 ℃·$(10a)^{-1}$；平均气温次之，为0.34 ℃·$(10a)^{-1}$；最高温度增温速率最慢，为0.29 ℃·$(10a)^{-1}$。

(3) 降水量和降水日数的平均气候态分布类似，总体表现为中间地区降水多于两端。大部分地区降水量在600 mm以下，降水日数低于60 d。降水中心位于巴基斯坦东北部，降水量可超过1200 mm，降水日数高达120 d。近40 a来，中巴经济走廊地区降水量和降水日数的变化趋势区域性差异较大，整体变化趋势不显著。其中降水在巴基斯坦西南部显著减少，最大速率为−20 mm·$(10a)^{-1}$；降水日数则在巴基斯坦中部地区显著增加，最大速率为4 d·

$(10a)^{-1}$。

(4) 中巴经济走廊地区大部分为干旱半干旱区域,干湿变化存在显著区域差异,但中部和东北地区变化不显著,西南部干旱区存在显著变干趋势。

参考文献(References):

[1] Shahid Z, Piracha A. Climate Change Impacts in Pakistan: Awareness and Adaptation[J]. The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses, 2010, 2(1): 119–130.

[2] 张耀南.《中巴经济走廊专题》卷首语[J]. 中国科学数据, 2019, 4(3): 5–7. [Zhang Yaonan. Preface to the special topic of China-Pakistan Economic Corridor[J]. China Scientific Data, 2019, 4(3): 5–7.]

[3] 王会军. 气候变化研究与环境和发展问题紧密相扣[J]. 科学通报, 2016, 61(10): 1027–1028. [Wang Huijun. Climate change research is closely linked to environmental and development issues [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(10): 1027–1028.]

[4] 丑洁明, 董文杰, 延晓冬. 关于气候变化对社会经济系统影响的机理和途径的探讨[J]. 大气科学, 2016, 40(1): 191–200. [Chou Jieming, Dong Wenjie, Yan Xiaodong. The impact of climate change on the socioeconomic system: A mechanistic analysis[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(1): 191–200.]

[5] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535.

[6] 黄艳艳, 王会军. 2020年全球变暖会创新高吗?[J]. 大气科学学报, 2020, 43(4): 585–591. [Huang Yanyan, Wang Huijun. How about the global warming in 2020?[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(4): 585–591.]

[7] 黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 9–14. [Huang Jianping, Ji Mingxia, Liu Yuzhi, et al. An overview of arid and semi-arid climate change[J]. Climate Change Research, 2013, 9(1): 9–14.]

[8] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. Nature Climate Change, 2015, 6(2): 166–171.

[9] Barlow M, Zaithik B, Paz S, et al. A review of drought in the middle east and Southwest Asia[J]. Journal of Climate, 2016, 29: 8547–8574.

[10] Adnan S, Ullah K, Li S L, et al. Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan[J]. Climate Dynamics, 2018, 51: 1885–1899.

[11] Sivakumar M, Lal R, Selvaraju R, et al. Climate Change and Food Security in West Asia and North Africa[M]. Dordrecht: Springer, 2013: 27–51.

[12] 张强, 韩兰英, 郝晓翠, 等. 气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性[J]. 气象学报, 2015, 73(6): 1092–1103. [Zhang Qiang, Han Lanying, Hao Xiaocui, et al. On the impact of the climate change on the agricultural disaster loss caused by drought in China and the regional differences between the North and the South[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(6): 1092–1103.]

[13] Tangdamrongsub N, Hwang C, Kao Y C. Water storage loss in central and south Asia from GRACE satellite gravity: Correlations with climate data[J]. Natural Hazards, 2011, 59(2): 749–769.

[14] Wang Y J, Zhou B T, Qin D H, et al. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China: Observation and projection[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(3): 289–305.

[15] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 1–9. [Shang Shasha, Lian Lishu, Ma Ting, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 years[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 1–9.]

[16] 陈亚宁, 王怀军, 王志成, 等. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 1–9. [Chen Yaning, Wang Huaijun, Wang Zhicheng, et al. Characteristics of extreme climatic/hydrological events in the arid region of northwestern China[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 1–9.]

[17] 毛炜峄, 姚俊强, 陈静, 等. 1961—2017年东帕米尔高原极端升温过程气候变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1368–1378. [Mao Weiyi, Yao Junqiang, Chen Jing, et al. Change characteristics of extreme temperature-rising process in the east pamirs during 1961–2017[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1368–1378.]

[18] Ullah W, Wang G J, Ali G, et al. Comparing multiple precipitation products against in-situ observations over different climate regions of Pakistan[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 628–652.

[19] Ullah S, You Q, Ullah W, et al. Observed changes in maximum and minimum temperatures over China-Pakistan economic corridor during 1980–2016[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(3): 1457–1475.

[20] Ullah S, You Q L, Ullah W, et al. Daytime and nighttime heat wave characteristics based on multiple indices over the China-Pakistan economic corridor[J]. Climate Dynamics, 2019, 53: 6329–6349.

[21] 赵建婷, 王艳君, 苏布达, 等. 印度河流域气温、降水、蒸发及干旱变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 349–359. [Zhao Jianting, Wang Yanjun, Su Buda, et al. Spatiotemporal distributions of temperature, precipitation, evapotranspiration, and drought in the Indus River Basin[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 349–359.]

[22] Anjum M N, Ding Y J, Shangguan D H. Simulation of the projected climate change impacts on the river flow regimes under CMIP5 RCP scenarios in the westerlies dominated belt, northern Pakistan [J]. Atmospheric Research, 2019, 227: 233–248.

[23] Wang A, Wang Y, Su B, et al. Comparison of changing population exposure to droughts in river basins of the Tarim and the Indus[J]. Earth's Future, 2020, 8(5): 1–13.

[24] Adnan S, Ullah K, Gao S T. Investigations into precipitation and drought climatologies in south Central Asia with special focus on Pakistan over the period 1951−2010[J]. Journal of Climate, 2016, 29(16): 6019−6035.

[25] Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 109−126.

[26] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 894−903. [Wen Xinyu, Wang Shaowu, Zhu Jinhong. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CUR high resolution grid data[J]. China Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 894−903.]

[27] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于CRU资料的中亚地区气候特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 396−403. [Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing. Climatic characteristics in central Asia based on CRU data [J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 396−403.]

[28] Cherlet M, Hutchinson C, Reynolds J, et al. World Atlas of Desertification[M]. Luxembourg: Publication Office of the European Union, 2018.

[29] 张旺雄, 刘普幸. 1961—2017年柴达木盆地干湿状况及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1391−1400. [Zhang Wangxiong, Liu Puxing. Surface humid situation and its affecting factors in the Qaidam basin from 1961to 2017[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1391−1400.]

[30] Monteith J L. Evaporation and surface temperature[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1981, 107(451): 1−27.

[31] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1948, 193(1032): 120−145.

Spatio-temporal characteristics of climate change in China-Pakistan Economic Corridor from 1980 to 2019

YU Zhixiang[1], YU Xiaojing[2,3], YANG Fan[4]

(1. Urumqi Meteorological Satellite Ground Station, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Desert Meteorology, Chinese Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: The China-Pakistan economic Corridor (CPEC) runs through Kashi, Xinjiang, China, and Pakistan; it is the flagship project of one belt and one road. This region has varied topography, complex and changeable climate, and frequent extreme events. Especially regarding global warming, climate change research has been closely linked to environmental and development issues. It is important for project implementation and security to better understand the spatio-temporal characteristics of climate change in this region. Using the monthly Climatic Research Unit Time Series v. 4.04 (TS v. 4.04), the detailed climatology and change in temperature, precipitation, and dry-wet condition over CPEC during 1980−2019 were analyzed. The results showed that temperature has a significant increasing tendency with the highest rate in the central CPEC than the two ends. The rate of minimum temperature [0.37 °C·(10a)$^{-1}$] is higher than the mean temperature [0.32 °C·(10a)$^{-1}$] and maximum temperature [0.29 °C·(10a)$^{-1}$]. There were larger regional differences in precipitation change, wet days, and dry-wet situations. Precipitation is considerably decreasing in the southwestern CPEC with a maximum rate of −20 mm·(10a)$^{-1}$. It is getting dry, while the wet days significantly increase in the central CPEC with a maximum rate of 4 d·(10a)$^{-1}$.

Keywords: China-Pakistan Economic Corridor; temperature; precipitation; dry-wet change